

BASILICA DI SANT'ALESSANDRO - ROMA

Oggetto	Verifica di sicurezza strutturale – Progetto di restauro conservativo
Luogo	Roma, via Nomentana 1291
Committente	Pontificia Commissione di Archeologia Sacra
Classe d'uso	III
Zona sismica	2
Tempistiche	25.04.2019 – 21.02.2020
Progettista	ing. Marco Brognoli (verifica - progetto) - IDES srl (prove in situ)

DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO

La sua scoperta risale al 1854 nell'ambito della campagna di scavi condotta dalla Pontificia Commissione di Archeologia Sacra: vennero in luce i resti di una basilica con annessa area funeraria che doveva servire al culto e alla sepoltura delle comunità rurali di *Nomentum* (presso l'odierna Mentana) e *Ficulea* (borgo nelle immediate vicinanze della chiesa).

Il piccolo nucleo sepolcrale fu riconosciuto come il cimitero di S. Alessandro, per il rinvenimento di un'iscrizione dedicatoria che indicava le sepolture di Alessandro e dei suoi compagni martiri Evenzio e Teodulo, probabilmente vittime della persecuzione dell'Imperatore Diocleziano. La primitiva basilica fu eretta nel II secolo d.C. per commemorare i tre Santi, ma la sua struttura definitiva, composta da due ambienti basilicali contrapposti, risale al IV secolo ad opera di Urso, vescovo dei vicini centri di Ficulea e di Nomentum, con i quali la Basilica appare sempre in stretta relazione. Nel sottosuolo si estendono le catacombe, connesse all'edificio tramite gallerie, costituite da due nuclei separati su un unico piano, ricche d'iscrizioni e pitture.

Durante la guerra gotica (535-553 d.C.) le catacombe e la basilica furono devastate dalle milizie di Alarico e Genserico. La traslazione dei corpi dei santi nel IX secolo portò al sostanziale abbandono del complesso. Nel 1936, in seguito ai lavori per la costruzione di una chiesa, successivamente abbandonati, l'architetto Clemente Busiri Vici creò un armonioso complesso architettonico a protezione delle catacombe.



INDAGINI ESEGUITE

Sulle **murature** sono state effettuate le seguenti indagini: rilievi della verticalità delle murature perimetrali; scavo in fondazione; carotaggi nel tufo e prelievo di laterizio per prove a compressione in laboratorio; analisi endoscopiche per la verifica della stratigrafia delle murature; prove con martinetto piatto singolo e con martinetti piatti doppi per la determinazione delle caratteristiche meccaniche della muratura; prove penetrometriche su malta per la determinazione della classe di resistenza meccanica; prove sclerometriche su elemento lapideo per la stima della durezza superficiale; analisi gravimetriche per la determinazione del contenuto d'acqua nella muratura.

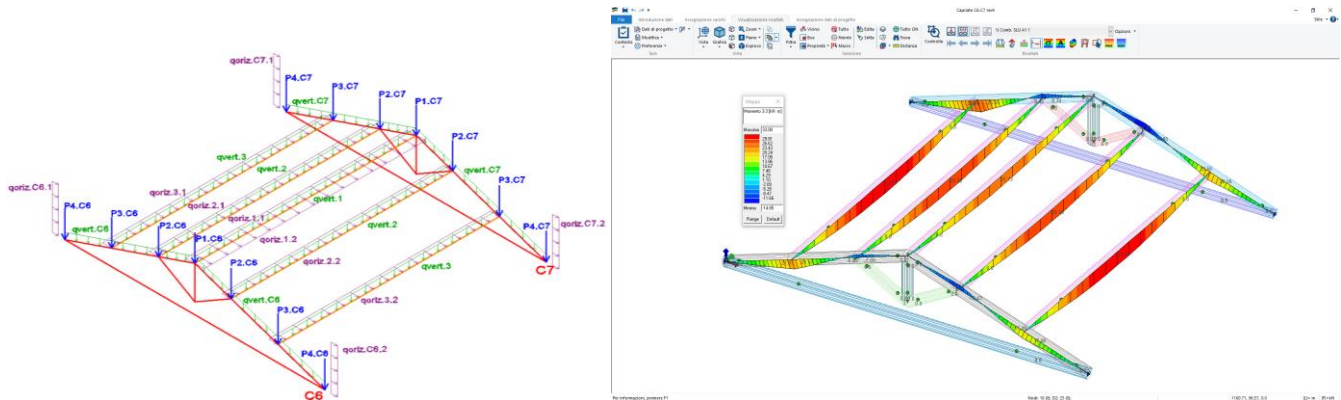


Sulle **strutture lignee** di copertura sono state effettuate: rilievo geometrico e strutturale; analisi resistografiche per l'individuazione delle variazioni di densità interne del legno; prove penetrometriche per valutare le proprietà meccaniche del legno; prove ultrasoniche per valutare l'omogeneità del legno; analisi igrometriche per la determinazione dell'umidità del legno; analisi endoscopiche per la verifica dell'appoggio delle capriate.



ANALISI DELLA STRUTTURA E VERIFICA STRUTTURALE

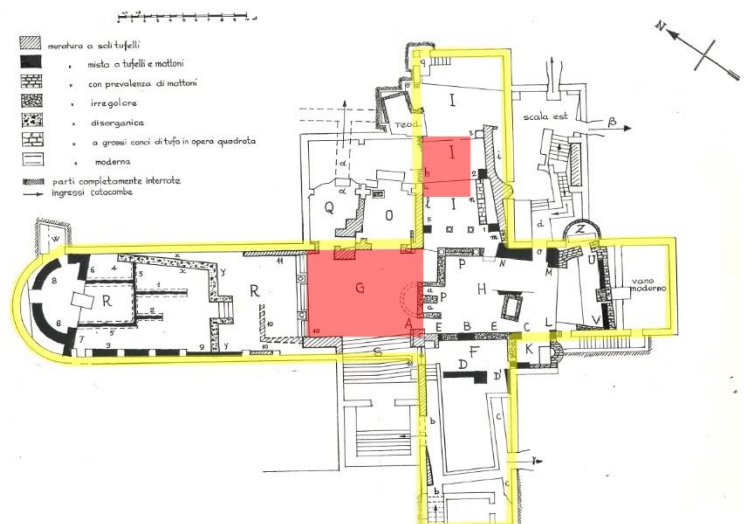
Con riferimento al § 7.2.6 delle *NTC18*, sono stati utilizzati modelli della struttura tridimensionali condotti con l'ausilio del software *Pro_SAP*, un codice di calcolo automatico che effettua l'analisi agli elementi finiti.



Nello specifico, la valutazione è redatta ai sensi del capitolo 8 delle *NTC18*, ove vengono definiti i criteri generali per la valutazione delle strutture esistenti. Gli aspetti di dettaglio vengono affrontati nella Circolare, sempre al capitolo 8, essendoci un'intenzionale corrispondenza di numerazione dei capitoli.

L'interpretazione dei risultati dalla *Campagna Diagnostica* strumentale effettuata sulla copertura lignea mostra significative vulnerabilità strutturali, il cui quadro generale dà luogo alle seguenti problematiche:

1. Alcuni elementi della struttura hanno una **capacità portante** inadeguata ai sensi delle vigenti normative. Tale condizione è l'esito del quadro delle verifiche di sicurezza allo *Stato Limite Ultimo*, laddove tali elementi strutturali lignei presentano comunque una certa vulnerabilità congenita. Questi elementi sono in grado di portare i carichi in essere, ma la loro capacità di portare sovraccarichi (neve, vento, sisma, etc.) è inferiore di quanto richiesto dalle *NTC18*.
2. Alcune capriate lignee presentano **presidi in acciaio** connessi alle catene, caratterizzati però da un'insufficiente tesatura e, pertanto, inadeguati al contenimento della spinta radiale; si segnala anche la vigenza di un sistema collaborante – poco efficace – realizzato con profilati metallici in aderenza agli elementi lignei, con funzione di rinforzo.
3. Gli elementi lignei presentano degrado da umidità, da **attacco da insetti xilofagi** e difetti localizzati quali fessure e nodi con diminuzione di resistenza. Il rischio di degrado di tipo biotico è direttamente proporzionale alla quantità di umidità contenuta nel legno, essendo determinante la correlazione tra l'ambiente in cui si trova il legno in opera e gli attacchi degli agenti biologici. Nel caso di specie si è rilevata una percentuale di umidità relativa interna pari a 88,9%: in tale condizione appare rilevante l'esposizione all'umidificazione in servizio delle travi lignee, con conseguente attacco di agenti biologici, in particolar modo i tarli.



L'interpretazione dei risultati dalla *Campagna Diagnostica* mostra le principali vulnerabilità strutturali della Basilica, il cui quadro generale dà luogo a quattro tipi di problematiche, che comportano significative vulnerabilità sismiche.

1. Alcuni elementi della struttura raggiungono - anche per azioni sismiche moderate - lo stato di **meccanismo cinematico**. Questi elementi e queste porzioni sono labili e quindi resistono ai carichi solo per massa, mentre la resistenza dei materiali non dà alcun contributo alla capacità portante. Sennonché la resistenza per massa di questi elementi è moderata; per cui non sono lontani dal collasso, che può essere attivato anche da modeste azioni sismiche.
2. Alcuni elementi della struttura hanno una **capacità portante**, ancorché superiore rispetto a quanto evidenziato al punto 1, inadeguata ai sensi delle vigenti normative. Tale condizione è l'esito del quadro delle verifiche di sicurezza allo *Stato Limite Ultimo*, laddove tali elementi strutturali - in particolare quelli lignei - presentano comunque una certa vulnerabilità congenita. Questi elementi sono in grado di portare i carichi in essere, ma la loro capacità di portare sovraccarichi è inferiore di quanto richiesto dalle *NTC18*.
3. L'organismo edilizio originario presenta una ridotta **capacità dissipativa**. Un eventuale terremoto potrebbe contare in misura marginale sulla capacità dissipativa del sistema strutturale; pertanto dovrebbe contare solo su quella capacità portante che ai punti 1 e 2 si è osservato essere inadeguata. Per cui la capacità sismica è molto modesta.
4. La snellezza dei maschi murari ed il modesto ammassamento tra muri ortogonali riduce la **rigidezza della struttura**, per cui viene meno il funzionamento scatolare. Lo stato di fatto non è quindi in grado di sopportare terremoti di modesta intensità senza danneggiarsi: azioni sismiche moderate avrebbero effetti sproporzionati sul manufatto rispetto alla causa in sé.

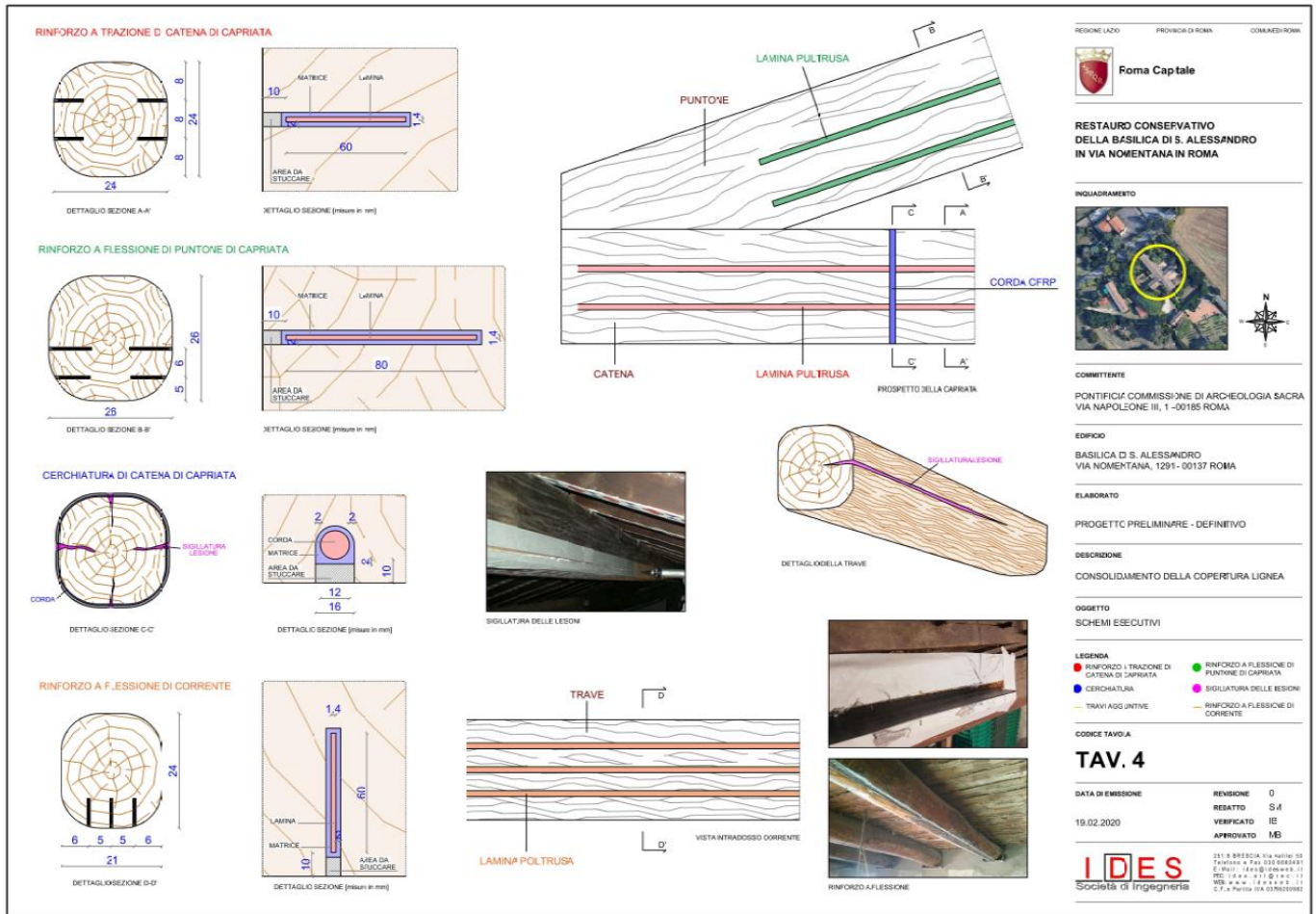
INTERVENTO PROPOSTO SULLE STRUTTURE LIGNEE

Per sopperire l'inefficienza strutturale dei componenti lignei si rende necessario il loro consolidamento. In estrema sintesi, il *Progetto* - senza alcuna sostituzione e sottrazione - prevede:

- la **bonifica** dei manufatti lignei esistenti;
- l'inserimento di alcuni **elementi lignei aggiuntivi (correnti)**, aventi natura e dimensioni analoghe a quelli esistenti;
- interventi di consolidamento degli elementi lignei inefficienti dal punto di vista strutturale, mediante l'inserimento interno, quindi senza non alterare l'aspetto estetico - di materiali compositi **fibro-rinforzati in carbonio (C-FRP, Carbon Fiber Reinforced Polimer)**.

Nell'ambito dell'intervento di consolidamento dell'orditura principale (capriate) e secondaria (correnti) si prevede un intervento di consolidamento atto ad incrementare la capacità portante e contenere le spinte radiali, destabilizzanti per le murature perimetrali. La tecnologia proposta prevede l'inserimento all'interno della sezione lignea di profili pultrusi realizzati, in opera o in stabilimento, con materiale composito fibro-rinforzato in carbonio (C-FRP, Carbon Fiber Reinforced Polimer) e solidarizzate mediante resina epossidica: preparazione del supporto e sigillatura delle lesioni; rinforzo a presso-flessione dei puntoni della capriata; rinforzo a trazione della catena della capriata; confinamento di elementi lignei; rinforzo a flessione dei correnti; ricostruzione di teste ed elementi ammalorati.





INTERVENTO PROPOSTO SULLE MURATURE PERIMETRALI

La soluzione delle problematiche presenti nelle murature può essere trovata **evitando un intervento di adeguamento globale**, ossia senza assoggettare l'intero organismo edilizio ad un consolidamento. Tale siffatto intervento coglierebbe sì gli obiettivi della sicurezza, ma disattenderebbe i **criteri del restauro**. In particolare, sarebbe assai **invasivo**. In questo caso, infatti, la conservazione dell'opera sarebbe in antitesi con un intervento strutturale globale. Inoltre, sarebbe decisamente **oneroso**: i suoi costi sarebbero molto maggiori di quanto stringentemente necessario.

Al contrario, la soluzione delle problematiche sopra esposte può essere trovata con un **intervento mirato al dissesto**, ossia che ripara i singoli danni, indirizzato a fornire capacità strutturale per resistere l'innescò degli specifici meccanismi e interdire localmente le vulnerabilità congenite.

La soluzione delle problematiche strutturali della Basilica può essere ottenuta **interdicendo l'attivazione dei meccanismi cinematici più deboli**, alcuni dei quali sono incipienti e quindi pericolosi anche in campo statico, oltre che sismico. L'interdizione dei meccanismi più deboli può essere ottenuta soltanto **trasformando l'organismo strutturale murario in una muratura armata**.

Il rinforzo diffuso può essere conseguito attraverso la **cucitura attiva della muratura (CAM)**, che consiste in un "impacchettamento" della muratura con nastri in acciaio inox disposti nelle direzioni orizzontale e verticale, passanti attraverso lo spessore murario, e richiusi su sé stessi attraverso reggette previa applicazione di una pretensione.

Sebbene tale intervento sia principalmente finalizzato alla prevenzione della disgregazione della tessitura muraria, nel caso in esame può essere utilmente impiegato in quanto non presenta le controindicazioni degli intonaci armati: comporta una variazione di massa trascurabile, presenta interazioni minime con gli impianti e permette una regolare evaporazione dell'acqua di risalita capillare. Anche i collegamenti (in direzione trasversale, in corrispondenza dei solai e dei cantonali) risultano di facile esecuzione e di facile verificabilità. L'intervento permette di conseguire un incremento della resistenza e soprattutto della duttilità muraria.





Un'altra soluzione, tra le principali, atta a trasformare la muratura in muratura armata appartenente alla tipologia diffusa è l'inserimento di barre o trefoli d'acciaio armonico in fori di carotatura pre-praticati nelle strutture murarie (prefori). Queste armature vengono pre-tesate mediante martinetti; quindi, solidarizzate alla muratura mediante iniezione dei prefiori (con malta di calce) e con ancoraggi terminali. Così facendo, la muratura viene sia armata sia dotata di un regime coattivo che si oppone alle trazioni indotte dai sovraccarichi. Pertanto, le azioni di esercizio, compreso i terremoti eventi tempo di ritorno sino ai 100-150 anni, non provocano fessure. Ciò fa sì che la struttura garantisca un'adeguata rigidezza in servizio; gli eventi che possono danneggiare l'edificio hanno quindi probabilità

di occorrenza molto rara.

Nell'ambito del presente *Progetto* si prevede un intervento di consolidamento **puntuale**, atto a contenere le azioni degli elementi spingenti e ad incrementare le caratteristiche di resistenza della struttura, migliorandone il comportamento globale. La tecnologia proposta prevede l'impiego di un **sistema di tiranti verticali interni, di diametro 16 mm, di tipo attivo, pretensionati in opera e realizzati in acciaio inossidabile AISI 304 ad alta resistenza** (f_u 750 N/mm² - f_y 650 N/mm²).

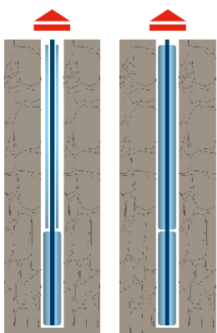
Per soddisfare le **esigenze di conservazione del patrimonio culturale** esistente, la tecnologia proposta prevede che l'elemento resistente, costituito da una barra in fibra di carbonio, sia dotato di una speciale **calza tubolare in tessuto**, che ha la funzione di controllare l'iniezione della matrice (boiaccia di calce pozzolanica) effettuata coassialmente, per mezzo di appositi dispositivi di iniezione, in modo da rendere solidale l'elemento di rinforzo alla muratura. L'ancoraggio completamente assemblato viene posizionato all'interno di un **perforo di diametro 5 cm**, realizzato nella muratura da consolidare; la speciale calza viene riempita gradualmente durante l'iniezione, effettuata a bassa pressione, fino a completa saturazione.



Per l'applicazione in questione si prevede, preliminarmente all'iniezione della matrice, che renderà solidale l'ancoraggio al substrato, una **pre-sollecitazione della barra in acciaio inox**; si otterrà in questo modo un **ancoraggio attivo** che, come nel caso di tiranti passivi, avrà la funzione di stabilizzare le deformazioni in atto ed impedirne ulteriori sviluppi ma, a differenza di questi, sarà immediatamente efficace.



Stente le caratteristiche geometriche e distributive del manufatto, tuttavia, non è possibile effettuare la tesatura con l'ausilio di elementi di contrasto, provvisori o permanenti, ad entrambe le estremità, ma creare un bulbo di ancoraggio in profondità, che funge da organo di ritegno, come nel caso di ancoraggi ciechi.



- a. Inserimento ancoraggio ad iniezione controllata con calza all'interno del preforo
- b. Iniezione del bulbo di profondità, dimensionato in funzione del carico di presollecitazione
- c. Posizionamento elementi di contrasto provvisori o permanenti all'estremità libera
- d. Successivamente all'avvenuta maturazione della matrice del bulbo di profondità, dopo un periodo di 28 giorni, può essere effettuata la tesatura della parte libera di barra al valore di pre-sollecitazione richiesta
- e. Iniezione della matrice nel secondo bulbo di superficie
- f. Eventuale rimozione degli elementi di contrasto, se provvisori, dopo un periodo prestabilito di maturazione (28 giorni)

